动 物 学 研 究 2013，Aug. 34(4): 429−436 CN 53-1040/Q ISSN 0254-5853
Zoological Research DOI:10.11813/j.issn.0254-5853.2013.4.0429

水流对团头鲂（*Megalobrama amblycephala*）幼鱼游泳行为的影响

张 倩，康 斌*

云南大学 国际河流与生态安全研究院，云南 昆明 650091

摘要：为探讨团头鲂幼鱼（*Megalobrama amblycephala*）游泳行为对水流的响应规律，该文通过特制鱼类游泳行为测定装置，测定了团头鲂幼鱼在 25 ℃，0、0.1、0.2、0.3、0.4 m/s 流速条件下的游速、游距、转角、至中心点的距离及游泳轨迹。结果表明：随着流速的增大，个体游速、游距及转角值均相应增大。0、0.1 及 0.2 m/s 流速组间的游速、游距及转角差异均不显著（P>0.05），但显著小于 0.3 和 0.4 m/s 组别，且 0.3 和 0.4 m/s 流速组之间差异均不显著（P>0.05）；整个时间段内，个体至中心点的距离随流速增大并未呈现明显规律性，各流速间差异不显著（P>0.05），游速与游距呈显著线性正相关，而与转角呈显著线性负相关，与至中心点的距离则无相关性；游泳轨迹随水流增大趋向复杂化。

关键词：水流速度；团头鲂；游泳速度；转角；游泳轨迹
中图分类号：Q959.46+8 **文献标志码**：A **文章编号**：0254-5853-(2013)04-0429-08

Effect of water velocity on swimming behavior of juvenile *Megalobrama amblycephala*

Qian ZHANG, Bin KANG*

Institute of International Rivers and Ecological Security, Yunnan University, Kunming 650091, China

Abstract: To investigate the swimming behavior of juvenile *Megalobrama amblycephala*, a tracking analysis device was designed to monitor behavior indicators including velocity (V), swimming distance (SD), turn angle (TA), distance to center-point (DC) and swimming track (ST) at different flow rates (0, 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4 m/s) at 25 °C. Results showed that indicator values all increased with increasing flow rate. Values of V, SD and TA showed no significant differences among the flow rates of 0, 0.1 and 0.2 m/s, respectively (P>0.05). However, they increased obviously at flow rates of 0.3 and 0.4 m/s (P<0.05), with no significant differences found between these two flow rates (P>0.05). The SD value did not change markedly according to flow rates (P>0.05), while ST showed complex patterns corresponding to increasing flow rate. A significant linear positive correlation occurred in free-swimming fish between V and SD, while a negative relationship was found between V and TA. No regular relationship was deduced between swimming speed and DC.

Keywords: Water velocity; *Megalobrama amblycephala*; Swimming speed; Turn angle; Swimming track

游泳行为是鱼类最基本的生命活动，鱼类在水中的洄游、聚集、索饵、逃避敌害及生殖等生命活动都离不开游泳（Day & Butler，2005; He & Cai，1998；Li et al，2010；Wang et al，2010a）。研究鱼类游泳行为对阐明鱼类行为进化的生态适应机制具有重要意义（Chai et al，2006; Huang et al，2002）。目前国内、外有关流速对鱼类游泳行为的研究多集中在各种淡、海水鱼类（包括洄游性鱼类）的摆尾频率、喜好游速、游泳能力及高速游泳行为等方面（Castro-Santos，2005； Liu et al，2009；Yanase & Arimoto，2007; Yuan et al，2012）。Hinch et al（2002）对大麻哈鱼（*Oncorhynchus gorbuscha*）的游泳模式、游泳路径及空间利用进行了报道。随着科技手段的不断发展，游泳行为研究方法也从传统的直接观察和手工记录等定性行为研究，逐渐发展为水下摄像、船舶跟踪、计算机图像处理及卫星遥感遥测等

收稿日期：2013-01-31；接受日期：2013-04-20
基金项目：国家自然科学基金重点项目(U0936602)
*通信作者（Corresponding author)，E-mail: binkang@ynu.edu.cn

多种高效率、高精准度及广范围的定量研究（Yu & Zhang，2011），极大扩大了鱼类行为生态习性的研究领域。

团头鲂（*Megalobrama amblycephala*）又名团头鳊、武昌鱼及草鳊，隶属于鲤形目鲤科鲌亚科。多见于长江中下游中型湖泊，喜栖息于湖泊有沉水植物的敞水区域，在静水环境的中、下层产卵繁殖，冬季喜群集居于深水的泥坑环境中越冬。其肉味鲜美、成本低、生长快、抗病力强且成活率高，是我国主要淡水鱼类养殖对象，具有广阔发展前景（Li et al，1991）。目前有关团头鲂的研究多侧重于生理、饲料、生长及基因等方面，如血液指标、蛋白饲料的酶解速率、抗氧化力及线粒体 DNA 等（Cao et al，2012；Liu et al，2012; Tang et al，2011；Zhang et al，2012），而关于团头鲂幼鱼游泳行为对周围环境应对的生理生态研究鲜有报道。本研究以团头鲂幼鱼为实验对象，分析其对水流的行为适应特征，并阐释其对所栖息环境的适应机理，为团头鲂人工驯养繁殖的科学管理及流水养殖生产工艺改进提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼来源与暂养

实验用健康团头鲂幼鱼由云南农业大学动物科技学院水产实验室提供，共 15 条。实验鱼用 3%的食盐水消毒 3~5 min，随后放置于预先用 20 mg/L 的高锰酸钾消过毒的鱼缸（100 cm×40 cm×40 cm，实际水容量～120 L）暂养一个月。暂养期间以经曝气后的自来水为暂养水体，并利用鱼缸内置过滤增氧泵持续充氧，溶氧水平控制在>6 mg/L，周换水量约为暂养水体的 30%。每三天在 20:00 投喂饵料（主要成分棉粕为 22%、菜粕 22%及米糠 16.87%等）一次使其饱食，并在投喂 1 h 用虹吸法清除残饵及幼鱼粪便，并及时换水。暂养水温为（25±0.5）℃，室内自然光照。

1.2 实验装置与实验方法

本实验装置参照 Hauer & Lamberti（2006）及 Song et al（2008）设计的鱼类游泳行为和活动代谢同步测定装置，并进一步改造而成（图 1）。

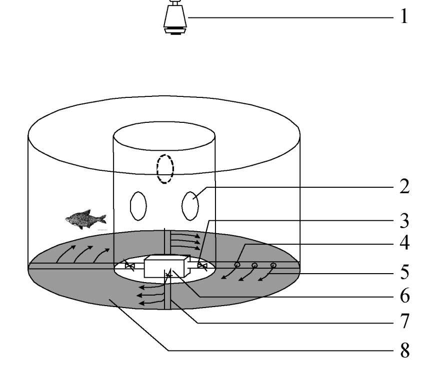


图 1 鱼类游泳行为和代谢测定装置

Figure 1 Device for measuring swimming behavior and activity metabolism

1：摄像机；2：水循环孔；3：流速阀门；4：喷水孔；5：水流方向；6：潜水泵；7：喷水管；8：环形泳道。

1：Camera; 2：Loop holes; 3：Flow rate valve; 4：Water-spout; 5：Flow direction; 6：Pump; 7：Spouting pipe; 8：Circular lane.

实验设置 0、0.1、0.2、0.3、0.4 m/s 五个流速梯度。流速通过实验装置中水泵阀门开关调节，由 LS300A 便携式流速测定仪（南京卓玛机电有限公司）测定大小，于不同水深及位点多次取值所得平均值为实验流速，以避免流场不均匀造成的误差。恒温加热棒控制实验温度保持在（25±0.5）℃。

实验前实验鱼禁食 48 h。随机选择一尾，放入已调好所需流速的环形水道，在静水条件下适应 3 h 后开启水泵进行实验，同时，开启安装在装置上方的摄像机实时记录实验鱼游泳行为，连续拍摄 60 min。拍摄过程中，用白纸遮住实验装置的底部及四周，避免光线及外界环境干扰，并在实验装置上方放置一个圆形纸板，防止实验鱼跳跃出环形水道。

实验结束后，用差量法称量实验鱼的湿体重（精确至 0.01 g），并用软尺测定其体长及尾鳍长（精确至 0.01 cm）。随后，清洁环形水道并用曝气后的自来水更换新水体。每一实验重复 3 次（表 1）。

1.3 数据处理

利用动物行为分析软件（Noldus Ethovision XT 8.0）分析团头鲂幼鱼游泳行为视频，并选取游泳速度（velocity, V）、游泳距离（swimming distance, SD）、转角（turn angle，TA）、至中心点距离（distance to center-point, DC）及游泳轨迹（swimming track, ST）等 5 个行为参数来描述不同流速下的游泳行为。其中，转角（TA）指鱼类向前游动时相邻的两个前进方向（heading）间的夹角，TA=前进方向 n（heading n）−前进方向 n-1（heading n-1），设定前进方向逆时针为正，至中心点的距离（DC）则指实验鱼到实验设备中心点的平均距离。

运用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析（one-way ANOVA），若组间差异显著则进行多重

表 1　团头鲂幼鱼形态指标

Table 1　Morphological indexes of juvenile *M. amblycephala*

水流流速 Water velocity （m/s）	体重 Weight （g）	尾数 Number （*n*）	体长 Length （cm）	尾鳍长 Length of tail fin （cm）	体重/体长 Weight/length	肥满度（K） Fatness （%）
0	24.26±1.57	3	12.5±0.00	2.63±0.26	1.94±0.13	1.24±0.08
0.1	23.89±1.84	3	12.5±0.00	2.83±0.24	1.91±0.15	1.22±0.09
0.2	22.82±1.76	3	12.33±0.17	2.67±0.24	1.85±0.12	1.21±0.05
0.3	22.15±0.85	3	12.33±0.24	2.53±0.05	1.80±0.07	1.18±0.07
0.4	24.37±2.14	3	12.27±0.19	2.90±0.14	1.99±0.119	1.33±0.16

肥满度（K）=100×（W/L^3），Fatness （%）=100 ×（W/L^3）。

比较 （LSD 法）。统计数据均用 mean±*SE* 表示，显著性水平为 *P*<0.05。

2　结　果

2.1　不同流速下团头鲂幼鱼的游速、游距、转角及至中心点的距离

各个时间段内，团头鲂幼鱼的游速均随流速增大而增大，从 0 m/s 的（1.56±0.37） m/s 增大至 0.4 m/s 的（23.14±3.74） m/s，但 0、0.1 和 0.2 m/s 流速组间游泳速度≤（8.18±3.43） m/s，流速增至 0.3 m/s 时，游泳速度急剧增大，为～19.27m/s。统计分析表明，0、0.1 和 0.2 m/s 流速组之间的游速差异不显著（*P*>0.05），但显著低于 0.3 和 0.4 m/s 流速组（*P*<0.05），且 0.3 和 0.4 m/s 流速组差异不显著（*P*>0.05）（表 2）。在 0、0.1 和 0.2 m/s 流速下，不同时间段内个体游泳速度变化相对平缓，在 0.3 和 0.4 m/s 流速下，0~20 min 时间段内，游泳速度缓慢上升，达到最高值（23.14±3.74）m/s，随后，呈下降趋势并逐渐趋于稳定（图 2A）。

表 2　不同流速下团头鲂幼鱼的游泳速度

Table 2　Swimming speeds of juvenile *M. amblycephala* at different water velocities （m/s）

时间段 Time （min）	水流速度 Water velocity （m/s）				
	0	0.1	0.2	0.3	0.4
10	0.016±0.37^{b}	0.041±0.95^{b}	0.068±3.18^{b}	0.18±5.46^{a}	0.21±2.96^{a}
20	0.017±0.23^{b}	0.042±0.8^{b}	0.078±2.46^{b}	0.22±6.96^{a}	0.23±3.74^{a}
30	0.013±0.03^{b}	0.050±1.75^{b}	0.075±1.25^{b}	0.20±7.09^{a}	0.18±1.48^{a}
40	0.016±0.25^{c}	0.056±0.47^{bc}	0.082±3.43^{b}	0.20±4.92^{a}	0.20±1.55^{a}
50	0.013±0.35^{b}	0.054±2.14^{b}	0.077±4.35^{b}	0.18±3.22^{a}	0.17±4.67^{a}
60	0.013±0.26^{b}	0.052±1.47^{b}	0.074±4.55^{b}	0.20±3.83^{a}	0.20±4.06^{a}

不同字母表示同一时间段不同流速组间具有显著性差异（*P*<0.05），以下同。

Different letters indicate significant differences; the same is true of the following tables.

在整个实验段内，团头鲂幼鱼游泳距离亦随流速增大而增大。无流速状态下，个体游距为（7.66±0.19）~（24.55±13.46） m/s，当流速增至 0.4 m/s 时，其游距>（100.45±10.21） m/s。0、0.1、0.2 m/s 流速组间的游距差异不显著（*P*>0.05），但显著低于 0.3 和 0.4 m/s 流速组（*P*<0.05），0.3 和 0.4 m/s 之间差异不显著（*P*>0.05）（表 3）。无流速状态下，个体在各个时间段内的游泳距离几乎无变化，0.1 和 0.2 m/s 流速下，游泳距离整体呈平缓上升趋势； 0.3 m/s 流速下，0~10 min 和 40~50 min 时间段内的游泳距离显著低于其他时间段；0.4 m/s 流速下，各时间段内个体游泳距离无显著差异（图 2B）。

团头鲂幼鱼的转角随流速增大而降低，即，转动程度随流速增大而增大（图 2C）。较低流速（0、0.1 和 0.2 m/s）时的平均转角≤1°，当流速增至 0.3 和 0.4 m/s 时，转角迅速转为逆向负值。整个时间段内，0、0.1 和 0.2 m/s 流速组的转角值之间差异均不显著（*P*>0.05），但与 0.3 和 0.4 m/s 流速组差异显著（*P*<0.05），而 0.3 和 0.4 m/s 之间差异不显著（*P*>0.05）（表 4）。

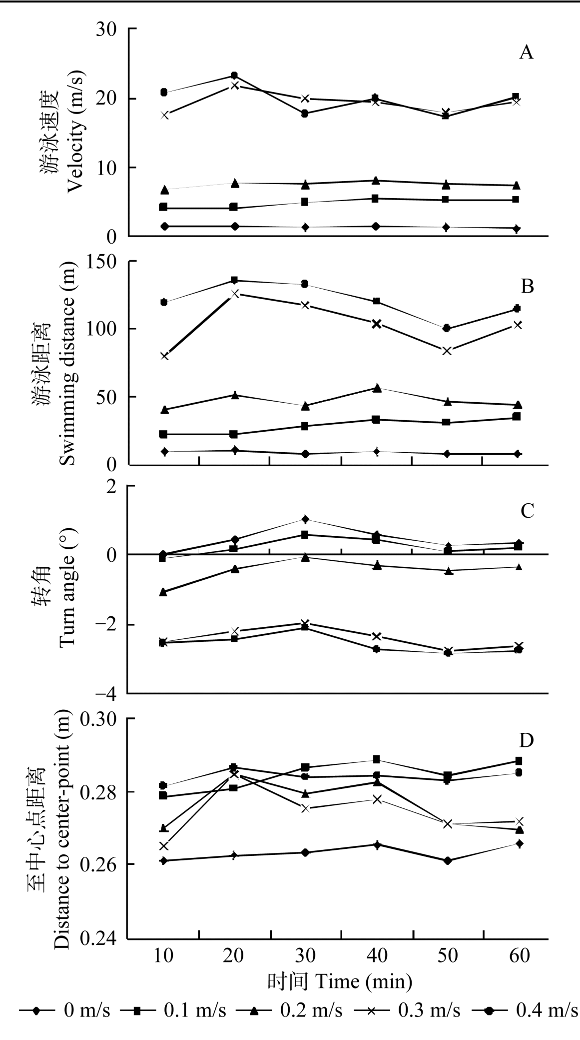


图2 60 min内不同流速下团头鲂幼鱼游泳行为的时间变化

Figure 2 Variation in swimming behavior of juvenile *M. amblycephala* at different flow rates over 60 min

整个时间段内，团头鲂幼鱼至中心点的距离随流速增大不呈现明显规律。5 个流速组之间至中心点距离均差异不显著（$P>0.05$）（表 5）。随着时间的延长，0、0.1、0.2、0.3、0.4 m/s 流速下个体的至中心点距离均无明显规律变化（图 2D）。

2.2 不同流速下团头鲂幼鱼的游泳轨迹

团头鲂幼鱼游泳轨迹对不同水流的响应见图 3，随流速的增大，个体游泳路径逐渐变得杂乱无章，轨迹趋向复杂化，并布满整个环形水道。低流速（0、0.1 及 0.2 m/s）时，游泳路径较单一，主要为集中在某一特定区域的小幅度游动。无流速和流速为 0.1 m/s 时，游泳轨迹较平缓，随流速增大呈缓慢游动状态，0.2 m/s 时，游泳状态发生明显改变，除在特定活动范围内外，也在其他区域活动。流速增至 0.3 和 0.4 m/s 时，游泳路径急剧复杂化，轨迹不平缓，呈明显不规则状态。0.3 m/s 时的游泳轨迹多数时间仍聚集于特定区域，而 0.4 m/s 时的游泳路径则均匀分布于整个环形水道。

2.3 游泳速度与游距、转角及至中心点距离的回归分析

回归分析结果表明，团头鲂幼鱼游速（V）与游距（SD）呈显著正线性相关（图 4A），与转角（TA）呈显著负线性相关（$P<0.05$）（图 4B），而与至中心点距离呈不显著线性相关（$P>0.05$）（图 4C）。

25 ℃时，$SD=5.67V+1.11$（$n=15$，$R^2=0.9636$，$P<0.05$）；$TA=-0.1649V+0.813$（$n=15$，$R^2=0.9124$，$P<0.05$）。

表 3 不同流速下团头鲂幼鱼的游泳距离

Table 3 Swimming distance of juvenile *M. amblycephala* at different water velocities （m）

时间段 Time （min）	水流速度 Velocity （m/s）				
	0	0.1	0.2	0.3	0.4
10	9.30±2.20[c]	21.60±6.51[c]	39.83±19.44[bc]	79.70±36.70[ab]	118.93±20.57[a]
20	9.97±1.39[b]	21.72±4.60[b]	50.40±13.01[b]	125.92±43.18[a]	135.38±21.90[a]
30	7.79±0.19[b]	28.01±8.61[b]	43.23±8.33[b]	116.89±43.30[a]	132.79±3.33[a]
40	9.73±1.61[c]	32.43±3.75[bc]	56.61±20.63[b]	103.50±32.42[a]	120.45±52.24[a]
50	7.65±2.26[c]	30.12±15.13[c]	45.55±26.25[bc]	83.31±53.31[ab]	100.37±29.93[a]
60	7.53±1.53[b]	34.52±9.37[b]	44.49±27.34[b]	102.72±28.96[a]	114.34±26.27[a]

表 4 不同流速下团头鲂幼鱼的转角

Table 4 Turn angle of juvenile *M. amblycephala* at different water velocities

时间段 Time （min）	水流速度 Water velocity （m/s）				
	0	0.1	0.2	0.3	0.4
10	0.02±0.26[a]	−0.1±0.54[a]	−1.07±3.62[ab]	−2.5±0.25[b]	−2.5±1.01[b]
20	0.43±0.93[a]	0.18±0.64[a]	−0.41±0.8[a]	−2.2±0.45[b]	−2.4±0.99[b]
30	1.01±−1.1[ab]	0.58±0.65[a]	−0.06±0.31[ab]	−2.0±0.51[b]	−2.1±0.7[b]
40	0.58±0.48[a]	0.43±0.43[a]	−0.29±0.44[ab]	−2.4±0.64[b]	−2.7±1.25[b]
50	0.26±1.04[a]	0.08±1.63[ab]	−0.45±1.47[abc]	−2.7±0.56[bc]	−2.9±2.81[c]
60	0.36±0.11[a]	0.19±0.45[a]	−0.32±0.96[a]	−2.6±0.77[b]	−2.8±0.9[b]

表 5　不同流速下团头鲂幼鱼至中心点的距离

Table 5　Distance to center-point of juvenile *M. amblycephala* at different water velocities　（m）

时间段 Time （min）	水流速度 Water velocity （m/s）				
	0	0.1	0.2	0.3	0.4
10	0.26±0.02[a]	0.28±0.01[a]	0.27±0.02[a]	0.27±0.01[a]	0.28±0.01[a]
20	0.26±0.01[a]	0.28±0.01[a]	0.28±0.01[a]	0.28±0.02[a]	0.29±0.02[a]
30	0.26±0.02[a]	0.29±0.00[a]	0.28±0.02[a]	0.28±0.01[a]	0.28±0.01[a]
40	0.27±0.02[a]	0.29±0.01[a]	0.28±0.02[a]	0.28±0.02[a]	0.28±0.01[a]
50	0.26±0.02[a]	0.28±0.02[a]	0.27±0.02[a]	0.27±0.02[a]	0.28±0.01[a]
60	0.27±0.01[a]	0.29±0.01[a]	0.27±0.03[a]	0.27±0.02[a]	0.28±0.01[a]

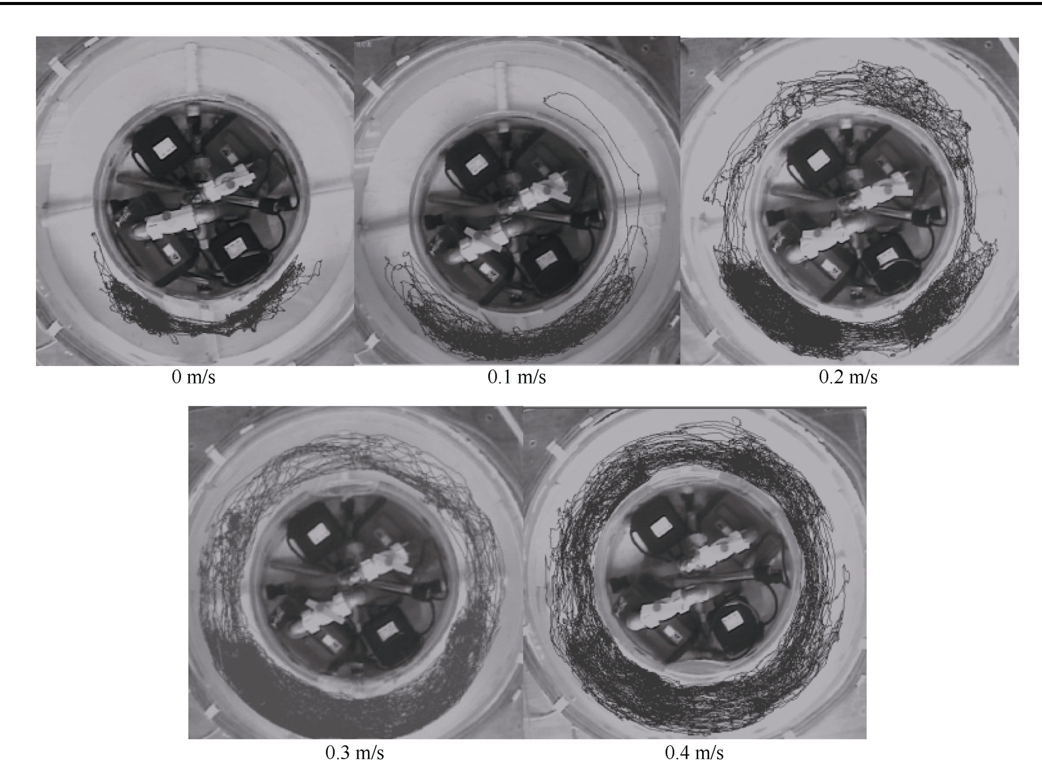


图 3　60 min 内在不同流速下团头鲂幼鱼的游泳轨迹

Figure 3　Variation of swimming track of *M. amblycephala* at different flow rates over 60 min

3　讨　论

3.1　流速对团头鲂幼鱼游泳速度的影响

鱼类对水流具有选择性，能主动对抗水流而逆流游泳，并通过调整自身游泳游速适应流速，使其保持逆流游泳状态或停留于某一特定位置（Li et al，2010; Song，2008）。不同鱼种的喜好流速范围各异，这与鱼种的体形、体长及复杂的外界条件等密切相关，也是鱼类在长期进化过程中发展形成的特定生态特征与栖息地环境相互适应的结果（Zhao & Han，1980）。团头鲂幼鱼的游泳速度随流速增大而增大，在 0.3 m/s 时游泳急剧增大（mean=19.27 m/s），即，团头鲂幼鱼的喜好流速≤0.3 m/s，并在该水流范围内处于最佳游泳状态，与光倒刺鲃（*Spinibarbus hollandi*）、瞻星平鳍鲇（*Amphilius uranoscopus*）、虹鳟（*Oncorhynchus mykiss*）及黄鱼对流速的喜好一致（Kadye et al, 2008）。团头鲂喜栖息于静水湖泊环境（Yang，1987），当流速超出团头鲂幼鱼的克流能力也即极限流速时就会迫使其被动游泳（Wu，1990）。本实验中团头鲂幼鱼的游距均随水流速度相应增加。当流速达到 0.4 m/s 时，其游距急剧增至>（10 045±1 021.42） cm/s，过高流速对团头鲂幼鱼产生一定胁迫作用，使其长时间随水流被动游泳，与上述游速变化规律一致。

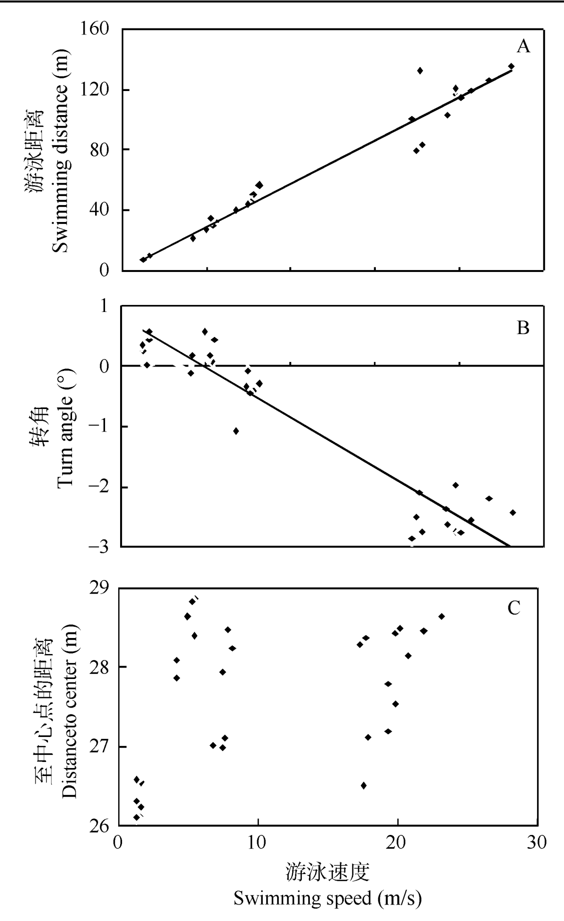


图 4 团头鲂幼鱼游泳速度与游泳距离和转角之间的回归关系

Figure 4 Regression relationship between speed, distance and turn angle of *M. amblycephala*

3.2 流速对团头鲂幼鱼转角的影响

鱼类在水中具有超强的巡游和机动性能，可本能地巧妙利用流体力学原理，利用水流的非定常性，通过调整身躯和胸鳍、尾鳍的动作来控制水流动力及结构，减少能量损耗并提高前进推力，如进行逃逸和捕食等（Tong，2000）。作为鱼体运动参数，转角对于判定鱼类运动状态，反映其生活习性具有重要生态学意义（Kato et al，1996）。目前有关鱼类转角的研究多集中在鱼类运动模型、仿生机器人水动力性能、推进机制及路径规划等方面（Wang et al，2010a；Wang，2010b）。

团头鲂幼鱼的转动程度（转动角度绝对值）随流速增大而增大。较低流速（0、0.1 和 0.2m/s）时的平均转角≤1°，推测该水流范围对其刺激较弱，使其仍能自由转动以达到最佳状态。较高流速时，其转动程度明显增大，可能是由于随着流速的增大，鱼体表面所受流体阻力也随之增大，需通过增加转动程度才能更好地利用水流中流向或流动结构，并及时调整自身的不同部位肌肉以保证产生足够的推进力，使其维持在喜好状态。其他相关研究也表明，不同物种间的相对旋转半径差异很大，并与身体灵活性、侧面积、质量及栖息环境等密切相关（Howland，1974）。如，侧扁型的天使鱼（*Pterophyllum eimeki*）喜栖息于水草丛和珊瑚礁中，喜经常改变运动方向以逃避敌害，纺锤型的中华倒刺鲃（*Spinibarbus sinensis*）在受到电刺激后均表现为“C 型”逃逸模式，而逃逸快速启动的线速度也与相对旋转半径显著正相关，适于长距离快速游泳（Wang et al，2010a）。

团头鲂体型侧扁，长期生活在长有沉水植物的敞水区域中，不适于长距离快速游泳，因此，其转动程度对水流的响应阈值偏低，逆流游泳能力与其生存适合度相关。本研究从流体力学和生态学角度探讨了团头鲂幼鱼的逆流游泳行为，为进一步研究鱼类捕食或逃避敌害行为模式提供了理论基础。

3.3 流速对团头鲂幼鱼游泳轨迹的影响

Kato et al（2004）对斑马鱼（*Danio rerio*）的行为研究发现其幼鱼喜好沿水族箱壁或底部而非中心游泳，且成年斑马鱼则更喜欢以高游速沿箱壁或底部游动，Grossman et al（2010）也研究了麦角酰二乙胺（Lysergic acid diethylamide, LSD）对斑马鱼行为轨迹的影响(Kato et al，2004；Grossman et al，2010)。本研究发现，团头鲂幼鱼的游泳轨迹随流速增大而明显复杂化。较低流速时，实验鱼多数时间集中活动在某一特定区域，游泳轨迹较平缓，运动没有拘束，但处于不活泼状态；随流速的增大，其游泳轨迹变得复杂而不规则，可知此时流速已超出实验鱼的克流能力，使其失去维持自身平衡的能力，从而长时间地随水流流向被动游泳，此刻的游泳轨迹并不能代表其真实的游泳能力。另外，不同流速组团头鲂幼鱼的至中心点距离并不表现一定的规律，可能是其对喜好游泳位置的选择不受外界流体改变的影响。该实验结果与前人研究不一致，可能有以下原因：（1）不同的鱼种、体型或年龄有着不同的运动模式；（2）不同实验设备可能刺激实验鱼产生不同的行为反应；（3）本实验设备不能记录实验鱼的 3D 空间利用程度，因此，不能反映实验鱼对空间位置选择的响应规律。

3.4 持续时间对团头鲂幼鱼游泳速度、游泳距离、转角及至中心点距离的影响

本研究表明，在 60 min 的连续观测中，0、0.1

及 0.2 m/s 流速下的团头鲂幼鱼的游泳速度及游泳距离因水流刺激不够强而一直维持在相对稳定水平。0.3 和 0.4 m/s 流速下的团头鲂幼鱼游泳速度、游泳距离及转角变化等，均呈现先升高（前 20 min）后降低（30～50 min）的规律变化，游泳距离在最后的 50～60 min 内再次上升。这是由于实验刚开始进行时，团头鲂幼鱼受水流刺激，主动逆流游泳，积极调动自身各部分游泳机制以加快游泳，运动量变大，躯体摆动幅增强，随着时间的延长，也即 30～50 min 后，游泳速度、游泳距离及转角的逐渐降低可能受运动强度的影响，长时间的高强度游泳使其接近力竭状态，致使有氧代谢功能比例下降，耗氧量急剧上升，无氧代谢产物乳酸过度积累，形成极量运动疲劳（Lee & Farrell，2003；Tian，2010；Zhao et al，2010），随后出现的上升并保持稳定的情况是否归因于幼鱼对不适宜环境的短暂生理适应性反应，还需进一步研究。实验鱼的至中心点距离在各个时间段内并不表现明显规律特征，因此，团头鲂幼鱼游动状态不受其所处水平位置干扰，但是否受垂直位置影响仍需深入探讨。

参考文献：

Cao XL, Chen JJ, Liu HJ, Wang JL, Nie GX. 2012. Study of enzymolysis kinetics with four kinds of protein feeds in *Megalobrama amblycephala in vitro*. *Journal of Animal and Veterinary Advances,* **11**(9): 1378-1384.

Castro-Santos T. 2005. Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes. *Journal of Experimental Biology,* **208**(Pt3): 421-432.

Chai Y, Xie CX, Wei QW, Liu NY. 2006. Research progress of fish behavior. *Reservoir Fisheries,* **26**(3): 45-47. [柴毅, 谢从新, 危起伟, 刘能玉. 2006. 鱼类行为学研究进展. 水利渔业, **26**(3): 45-47.]

Day N, Butler PJ. 2005. The effects of acclimation to reversed seasonal temperatures on the swimming performance of adult brown trout *Salmo trutta*. *Journal of Experimental Biology,* **208** (14): 2683-2692.

Grossman L, Utterback E, Stewart A, Gaikwad S, Min Chung K, Suciu C, Wong K, Elegante M, Elkhayat S, Julia T, Gilder T, Wu N, Dileo J, Cachat J, Kalueff AV. 2010. Characterization of behavioral and endocrine effects of LSD on zebrafish. *Behavioural Brain Research,* **214**(2): 277-284.

Hauer FR, Lamberti GA. Methods in Stream Ecology. Academic Press, 2006: 569-574.

He DR, Cai HC. 1998. Fish Behavior. Xiamen: Xiamen University Press. [何大仁, 蔡厚才. 1998. 鱼类行为学. 厦门: 厦门大学出版社.]

Hinch SG, Standen EM, Healey MC, Farrell AP. 2002. Swimming patterns and behaviour of upriver-migrating adult pink (*Oncorhynchus gorbuscha*) and sockeye (*O. nerka*) salmon as assessed by EMG telemetry in the Fraser River, British Columbia, Canada. *Hydrobiologia,* **483**(1-3): 147-160.

Howland HC. 1974. Optimal strategies for predator avoidance: the relative importance of speed and maneuverability. *Journal of Theoretical Biology,* **47**(2): 333-350.

Huang XR, Zhuang P. 2002. Status and practice of fish behavioral studies. *Freshwater,* **32**(6): 53-56. [黄晓荣, 庄平. 2002. 鱼类行为学研究现状及其在实践中的应用. 淡水渔业, **32**(6): 53-56.]

Lee CG, Farrell AP, Lotto A, MacNutt MJ, Hinch SG, Healey MC. 2003. The effect of temperature on swimming performance and oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon stocks. *Journal of Experimental Biology,* **206**(Pt18): 3239-3251.

Li SF, Zhou BY, Lin GQ. 1991. Growth and reproduction of *Megalobrama amblycephala* in Yunihu lake with the conservation of its resources. *Chinese Journal of Zoology,* **26**(6): 7-22. [李思发, 周碧云, 林国清. 1991. 淤泥湖团头鲂的生长与繁殖—兼谈资源的保护. 动物学杂志, **26**(6): 7-22.]

Li X, Lin XT, Song BL, Li D, Chen GZ. 2010. Effects of water velocities on swimming performances of juvenile tinfoil barb *Babodes schwanenfeldi*. *Chinese Journal of Zoology,* **45**(2): 126-133. [李想, 林小涛, 宋波澜, 李丹, 陈国柱. 2010. 流速对红鳍银鲫幼鱼游泳状态的影响. 动物学杂志, **45**(2): 126-133.]

Liu B, Xie J, Ge XP, Xu P, Miao LH, Zhou QL, Pan LK, Chen RL. 2012. Comparison study of the effects of anthraquinone extract and emodin from *Rheum officinale* bail on the physiological response, disease resistance of *Megalobrama amblycephala* under high temperature stress. *Turk Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,* **12**: 905-916.

Liu W, Zhuge YS, Ouyang L, Yu W, Liu DF. 2009. Experimental study of the effect of hydrodynamic conditions on fish growth. *Advances in Water Sciences,* **20**(6): 812-817. [刘稳, 诸葛亦斯, 欧阳丽, 余伟, 刘德富. 2009. 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究. 水科学进展, **20**(6): 812-817.]

Kadye WT, Moyo NAG, Magadza CHD, Kativu S. 2008. Habitat associations of three stream fishes on a montane plateau (Nyika Plateau, Malawi). *Acta Zoologica Sinics,* **54**(1): 67-76.

Kato S, Tamada T, Shimada Y, Chujo T. 1996. A quantification of goldfish behavior by an image processing system. *Behavioural Brain Research,* **80**(1): 51-55.

Kato S, Nakagawa T, Ohkawa M, Muramoto K, Oyama O, Watanabe A, Nakashima H, Nemoto T, Kayo S. 2004. A computer image processing system for quantification of zebrafish behavior. *Journal of Neuroscience Methods,* **134**(1): 1-7.

Song BL, Lin XT, Wang WJ, Lin GW. 2008. Effects of water velocities on rheotaxis behaviour and oxygen consumption rate of tinfoil barbs *Barbodes schwanenfeldi*. *Acta Zoologica Sinica,* **54**(4): 686-694. [宋波澜, 林小涛, 王伟军, 李国文. 2008. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化. 动物学报, **54**(4): 686-694.]

Tang SJ, Li SF, Cai WQ. 2011. Mitochondrial DNA analysis on genetic variation of wild, domesticated, and genetically selected populations of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*). *Journal of Fish Sciences of China,* **18**(3): 483-492. [唐首杰, 李思发, 蔡完其. 2011. 团头鲂野生、驯养、选育 3 类遗传生态群体遗传变异的线粒体 DNA 分析. 中国水产科学, **18**(3): 483-492.]

Tian K, Cao ZD, Fu SJ. 2010. Effects of velocity increment and duration on critical swimming speed of dark barbel catfish. *Chinese Journal of Ecology,* **29**(3): 534-538. [田凯, 曹振东, 付世建. 2010. 速度增量及持续时间对瓦氏黄颡鱼幼鱼临界游泳速度的影响. 生态学杂志, **29**(3): 534-538.]

Tong BG. 2000. Discussions on propulsive mechanism of fish undulatory swimming. *Mechanics in Engineering*, **22**(3): 69-74. [童秉纲. 2000. 鱼类波状游动的推进机制. 力学与实践, **22**(3): 69-74.]

Wang F, Cao ZD, Fu SJ, Chen BJ. 2010a. Fast-start and escape performance of juvenile *Spinibarhus sinensis*. *Chinese Journal of Ecology,* **29**(11): 2181-2186. [王芳, 曹振东, 付世建, 陈波见. 2010a. 中华倒刺鲃幼鱼的快速启动与逃逸行为. 生态学杂志, **29**(11): 2181-2186.]

Wang P, Gui FK, Wu CW. 2010a. Classification of fish swimming speed. *Journal of Fishery Sciences of China,* **17**(5): 1137-1146. [王萍, 桂福坤, 吴常文. 2010a. 鱼类游泳速度分类方法的探讨. 中国水产科学, **17**(5): 1137-1146.]

Wang RR. 2010b. Research on Hydrodynamic Performance of Fishlike Robot Undergoing Steady State Swimming. Master thesis, Harbin Institute of Technology. [王冉冉. 2010b. 仿鱼机器人稳态游动的水动力性能研究. 硕士学位论文, 哈尔滨工业大学.]

Wu XW. 1990. Cyprinid Fish of China. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. [伍献文. 1900. 中国鲤科鱼类志. 上海: 上海人民出版社.]

Yanase K, Arimoto T. 2007. A hydro-mechanical approach to the scaling of swimming performance in the sand flathead *Platycephalus bassensis* Cuvier: effects of changes in morphological features based on fish size. *Journal of Fish Biology,* **71**(6): 1751-1772.

Yang GR. 1987. Fish of Hubei. Wuhan: Hubei Science and Technology Press. [杨干荣. 1987. 湖北鱼类志. 武汉: 湖北科学技术出版社.]

Yu XM, Zhang XM. 2011. Research progress on measurements of fish swimming ability. *South China Fisheries Science,* **7**(4): 76-83. [于晓明, 张秀梅. 2011. 鱼类游泳能力测定方法的研究进展. 南方水产科学, **7**(4): 76-83.]

Yuan X, Tu ZY, Han JC, Wang XX, Shi XT, Liu GY, Huang YP. 2012. Effects of flow rate on swimming behavior and energy consumption of *Schizothorax chongi. Acta Hydrobiologica Sinica,* **36**(2): 270-275. [袁喜, 涂志英, 韩京成, 王学祥, 石小涛, 刘国勇, 黄应平. 流速对细鳞裂腹鱼游泳行为及能量消耗影响的研究. 水生生物学报, **36**(2): 270-275.]

Zhang YP, Liu B, Hua XL, Sun M, Xie J, Shi JJ. 2012. Effects of yeast nucleotide on growth performance, antioxidant function and disease resistance of bluntnose black bream. *Chinese Journal of Animal Nutrition,* **24**(3): 583-590. [张一平, 刘波, 华洵璐, 孙梅, 谢骏, 史济筠. 2012. 酵母核苷酸对团头鲂生长性能、抗氧化功能和抗病力的影响. 动物营养学报, **24**(3): 583-590.]

Zhao XK, Han ZE. 1980. Experiments on the current overcoming ability of some freshwater fishes. *Journal of Fisheries of China,* **4**(1): 31-37. [赵希坤, 韩桢锷. 1980. 鱼类克服流速能力的试验. 水产学报, **4**(1): 31-37.]

Zhao WW, Cao ZD, Fu SJ. 2010. Effects of duration on the measurement of swimming performance of southern catfish. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition,* **27**(4): 12-16. [赵文文, 曹振东, 付世建. 2010. 持续时间对南方鲇游泳性能测定结果的影响. 重庆师范大学学报: 自然科学版, **27**(4): 12-16.]